



## Duplex

PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE  
(Case No. 03-848)

## **CLAIM OF PRIORITY**

Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Dear Sir:

Applicant in the above-identified application, through the undersigned attorney, hereby requests that the above-identified application be treated as entitled to the right accorded by Title 35, U.S. Code, Section 119, having regard to the application, which particulars are set out below:

In Europe, Application No. 02020424.4, filed September 11, 2002.

A Certified copy of the priority document is enclosed.

Respectfully submitted,

McDONNELL BOEHNEN HULBERT &  
BERGHOFF

Dated: September 19, 2003

Edward K. Runyan  
Edward K. Runyan  
Reg. No. 43,067

McDonnell Boehnen  
Hulbert & Berghoff  
300 S. Wacker Drive  
Suite 3200  
Chicago, Illinois 60606  
(312) 913-0001





Eur päisches  
Patentamt

Eur p an  
Patent Office

Office européen  
des brevets

**Bescheinigung**

**Certificate**

**Attestation**

Die angehefteten Unterlagen stimmen mit der ursprünglich eingereichten Fassung der auf dem nächsten Blatt bezeichneten europäischen Patentanmeldung überein.

The attached documents are exact copies of the European patent application described on the following page, as originally filed.

Les documents fixés à cette attestation sont conformes à la version initialement déposée de la demande de brevet européen spécifiée à la page suivante.

**Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°**

02020424.4

Der Präsident des Europäischen Patentamts:  
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office  
Le Président de l'Office européen des brevets  
p.o.

R C van Dijk





Anmeldung Nr:  
Application no.: 02020424.4  
Demande no:

Anmelddetag:  
Date of filing: 11.09.02  
Date de dépôt:

## Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Omicron electronics GmbH  
Oberes Ried 1  
6833 Klaus  
AUTRICHE

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:  
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.  
If no title is shown please refer to the description.  
Si aucun titre n'est indiqué se referer à la description.)

Verfahren zum testen eines transformators und entsprechende testvorrichtung

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)  
revendiquée(s)  
Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/  
Classification internationale des brevets:

G01R31/00

Am Anmelddetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of  
filling/Etats contractants désignés lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE SK TR



**Verfahren zum Testen eines Transformators und entsprechende  
Testvorrichtung**

5

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine entsprechend ausgestaltete Testvorrichtung zum Testen eines Transformators. Insbesondere ist die vorliegende Erfindung zum 10 Testen von Messwandlern, vorzugsweise zum Testen von Stromwandlern, geeignet.

Gemäß der Norm IEC 60044-6 sind bei Messwandlern die folgenden Anforderungen zu prüfen:

15

1. Windungsübersetzungsfehler
2. Übersetzungsfehler und Fehlwinkel im eingeschwungenen Zustand
3. Wicklungswiderstand der Sekundärwicklung
- 20 4. Magnetisierungskenngrößen
5. Remanenzfaktor
6. Zeitkonstante des Sekundärkreises
7. Fehler bei Grenzbedingungen
8. Nachweis der Auslegung für niedrigen Streufluss

25

Bisher auf dem Markt befindliche Testgeräte verwenden einen direkt an das Niederspannungsnetz angeschlossenen verstellbaren Transformator (Variac), welcher als Prüfsignal für den jeweils zu testenden Messwandler ein sinusförmiges Signal mit 30 Netzfrequenz erzeugt. Mit diesen herkömmlichen Geräten können auf der Sekundärseite des Messwandlers Spannungen und Ströme erzeugt werden, welche auch im Nennbetrieb auftreten. Zum Prüfen der meisten gebräuchlichen Messwandler müssen daher diese Testgeräte eine Signalquelle mit einer Scheinleistung von bis 35 zu 5kW aufweisen. Für einige Messwandler werden Spannungen bis

4kV benötigt, andere benötigen Ströme bis 5A. Daher sind die auf dem Markt befindlichen Testgeräte entweder aufgrund ihrer hohen Ausgangsleistung sehr schwer oder sie können nur Messwandler mit kleinen Scheinleistungen prüfen, so dass sie lediglich beschränkt einsetzbar sind.

In der Norm IEC 60044-6 werden zwar Testverfahren beschrieben, bei denen zum Testen des jeweiligen Messwandlers Prüfsignale mit reduzierter Prüffrequenz oder Prüfspannung verwendet werden. Diesen Testverfahren ist jedoch gemeinsam, dass sie alleamt sehr ungenau sind, da das geänderte Verhalten von Messwandlern bei einem von der Nenn- bzw. Netzfrequenz abweichenden Betrieb nicht berücksichtigt wird.

Dieses Problem betrifft nicht nur den Test von Messwandlern (Strom- oder Spannungswandlern), sondern allgemein den Test von Transformatoren.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Testen eines Transformators, insbesondere eines Messwandlers, vorzugsweise eines Stromwandlers, sowie eine entsprechend ausgestaltete Testvorrichtung bereitzustellen, womit die zuvor beschriebenen Probleme behoben werden können, so dass ein zuverlässiger Test des Transformators auch bei Verwendung einer Signalquelle mit relativ geringer Ausgangsleistung zur Erzeugung des Test- bzw. Prüfsignals gewährleistet ist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren zum Testen eines Transformators mit den Merkmalen des Anspruches 1 bzw. einer Testvorrichtung mit den Merkmalen des Anspruches 16 gelöst. Die Unteransprüche definieren jeweils bevorzugte und vorteilhafte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung.

Erfindungsgemäß wird zum Testen eines Transformators, insbesondere eines Messwandlers, vorgeschlagen, zum Messen mehrerer insbesondere frequenzabhängiger Parameter des Transformators ein Prüfsignal an den Transformator anzulegen, dessen Frequenz

5 insbesondere kleiner als die Nenn- oder Betriebsfrequenz des Transformators ist. Aus den mit diesem Prüfsignal gemessenen Parametern wird ein Simulationsmodell abgeleitet, welches eine Simulation des Verhaltens des Transformators bei unterschiedlichen Frequenzen ermöglicht. Mit Hilfe dieses Simulationsmo-

10 dells bzw. den mit dem Prüfsignal gemessenen Parametern kann dann auf das Verhalten des Transformators bei Betrieb mit einer von der Frequenz des Prüfsignals abweichenden Frequenz, insbesondere auf das Verhalten des Transformators bei Betrieb mit der Nennfrequenz, geschlossen werden.

15

Das Simulationsmodell, welches mit Hilfe des Prüfsignals ermittelt wird, ist vorzugsweise derart ausgestaltet, dass es frequenz- und/oder spannungsabhängige Parameter des Transformators, insbesondere die Hauptinduktivität, Hystereseverluste,

20 Wirbelstromverluste und den Widerstand der Sekundärwicklung des Transformators, berücksichtigt. Hierzu wird jeweils das Prüfsignal sekundärseitig an dem zu testenden Transformator eingespeist und die sich daraufhin einstellenden Parameter des Transformators sekundärseitig gemessen. So ist beispielsweise

25 eine Messung des Widerstands der Sekundärwicklung dadurch möglich, dass als Prüfsignal über die sekundärseitigen Anschlussklemmen des Transformators ein Gleichstrom eingespeist und die daraufhin an den sekundärseitigen Anschlussklemmen abgreifbare Spannung gemessen wird, um daraus den Widerstand der Sekundär-

30 wicklung ermitteln zu können. Die Wirbelstromverluste des Transformators können durch mehrere Messungen bei identischem magnetischen Fluss, jedoch bei jeweils unterschiedlichen Frequenzen, insbesondere bei zwei unterschiedlichen Frequenzen, gemessen werden, wobei jeweils anschließend die Verlustleistung aus den gemessenen Strom- und Spannungsmomentanwerten an

den sekundärseitigen Anschlüsse des Transformators ermittelt werden kann. Die auf diese Weise gewonnene Verlustleistung kann in die Hystereseverluste und die Wirbelstromverluste des Transformators aufgesplittet werden. Zur Ermittlung der Hystereseverluste des Transformators kann die Magnetisierungs- oder Hysteresekurve des Transformators gemessen werden, wobei hierzu insbesondere ein periodisches Prüfsignal an die sekundärseitigen Anschlussklemmen des Transformators gelegt wird, um aus den sich daraufhin einstellenden Spannung- und Stromwerten sowie den auf zuvor beschriebene Art und Weise ermittelten Wirbelstromverlusten den Spannungs- und Stromverlauf an der Hauptinduktivität des Transformators zu ermitteln. Durch die Verwendung einer steuerbaren Signalquelle kann in demselben Testlauf automatisch der Wicklungswiderstand und das Strom/Spannungs-Übertragungsverhalten gemessen und die Hysteresekurve für eine beliebige Frequenz und eine beliebige Signalform berechnet werden.

Aus den zuvor beschriebenen Parametern des Transformators wird das Simulationsmodell bestimmt, mit dessen Hilfe der Strom- und Spannungsverlauf an den Anschlussklemmen des Transformators bei einer beliebigen Betriebsfrequenz und bei einer beliebigen Last abgeleitet werden kann. D.h. mit Hilfe des Simulationsmodells kann das Übertragungsverhalten des Messwandlers auch bei höheren Frequenzen oder Oberwellen simuliert werden.

Die vorliegende Erfindung wird bevorzugt zum Testen von Messwandlern, insbesondere von Stromwandlern, eingesetzt. Selbstverständlich ist die vorliegende Erfindung jedoch nicht auf diesen bevorzugten Anwendungsbereich beschränkt, sondern kann allgemein zum Testen beliebiger Transformatoren verwendet werden.

Ein mit der vorliegenden Erfindung verbundener wesentlicher Vorteil besteht darin, dass zum zuverlässigen Testen des je-

weiligen Transformators kein Prüfsignal bestimmter Frequenz oder bestimmter Spannung verwendet werden muss. Vielmehr erlaubt die vorliegende Erfindung die Verwendung eines Prüfsignals mit variabler Frequenz und variabler Spannung. Demzufolge

5 erforderdert die vorliegende Erfindung auch nicht die Verwendung einer leistungsfähigen Sinusspannungsquelle mit hoher Ausgangsleistung zur Generierung des Prüfsignals, sondern es kann auch mit einer Signalquelle niedriger Leistung, insbesondere mit einer sehr schwachen Signalquelle, praktisch jeder Trans-

10 formator oder Messwandler getestet werden. Der Test erfolgt nicht mit der Nennfrequenz des Transformators, sondern vorzugsweise mit einem Prüfsignal, dessen Frequenz kleiner als die Nennfrequenz des Transformators ist. Zudem ist die Spannung des Prüfsignals vorzugsweise deutlich geringer als die

15 Prüfspannung herkömmlicher Testgeräte. So kann insbesondere ein Prüfsignal verwendet werden, dessen Spannung wesentlich kleiner als derjenige Spannungswert ist, welcher zum Messen des so genannten Kniepunktes des Transformators bei der Nennfrequenz des Transformators nötig wäre. Das Prüfsignal ist da-

20 bei insbesondere derart beschaffen, dass es im Magnetkern des Transformators denselben magnetischen Fluss wie ein Prüfsignal bei der Nennfrequenz des Transformators bewirkt.

Mit Hilfe der vorliegenden Erfindung können somit alle existierenden Transformatoren oder Messwandler zuverlässig getestet werden. Durch die hierin vorgeschlagenen Messungen und dadurch bekannten Modellparameter können eine Vielzahl von unterschiedlichen Größen gemessen werden, wobei u.a. insbesondere eine Messung oder Berechnung des Windungsübersetzungsfehlers ("Ratio Error"), des Übersetzungsfehlers und Fehlerwinkels im eingeschwungenen Zustand ("Phase Displacement"), der Gesamtmessabweichung ("Composite Error"), des Remanenzfaktors ("Remanence Factor") und des Fehlers bei Grenzbedingungen ("Error at Limiting Conditions") möglich ist.

Das erfindungsgemäße Testgerät kann aufgrund seiner sehr geringen Ausgangsleistung sehr leicht, und insbesondere in Form eines tragbaren Geräts, ausgestaltet werden. Da nur wenig Ausgangsleistung aufgebracht werden muss und zudem ein Test des 5 jeweiligen Transformators auch mit einem nicht-sinusförmigen Prüfsignal möglich ist, sind die mit dem Testgerät verbundenen Herstellungskosten ebenfalls sehr gering. Ein Rechteck-Prüfsignal ist grundsätzlich billiger zu generieren als ein Sinus-Prüfsignal. Der Test des jeweiligen Transformators erfolgt 10 vorzugsweise automatisiert, so dass reproduzierbare Testergebnisse erzielt werden können. Da mit dem gemessenen Simulationsmodell des Transformators gearbeitet wird, kann das Verhalten des Transformators bei unterschiedlicher Belastung 15 simuliert werden, ohne dass hierzu eine Hochleistungssignalquelle erforderlich wäre. Durch das Rückrechnen der somit gewonnenen Messergebnisse auf die Nennfrequenz des Transformators erhält die Bedienperson das tatsächlich bei der Anwendung auftretende Verhalten des Transformators, da in den Messergebnissen 20 die tatsächlich an dem Transformator auftretenden Spannungen und Ströme dargestellt werden.

Die vorliegende Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die beigefügte Zeichnung anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels näher erläutert.

25 In der einzigen Figur ist ein Ersatzschaltbild eines zu testenden Transformators oder Messwandlers dargestellt.

Dabei bezeichnen P1, P2 primärseitige Anschlussklemmen und S1, 30 S2 sekundärseitige Anschlussklemmen des Messwandlers. Np und Ns bezeichnen die primäre bzw. sekundäre Windungszahl des (ideal) Messwandlers, während Rp und Lp den Widerstand bzw. die Streuinduktivität der Primärwicklung und R<sub>ct</sub> und Ls den Widerstand bzw. die Streuinduktivität der Sekundärwicklung des 35 Messwandlers bezeichnen. R<sub>H</sub> entspricht den Hystereseverlusten

- des Messwandlers, während Reddy den Wirbelstromwiderstand des Messwandlers zur Modellierung der Wirbelstromverluste darstellt.  $L_{main}$  bezeichnet die Hauptinduktivität des Messwandlers. Die Hauptinduktivität  $L_{main}$  und die Hystereseverluste  $R_H$  des Messwandlers werden - wie nachfolgend noch näher erläutert wird - mit der Hystereseschleife des Messwandlers modelliert. Mit  $Z_b$  ist die Impedanz der Last oder Bürde des Messwandlers bei Nennfrequenz bezeichnet.  $I_p$  bezeichnet den über die primärseitigen Anschlussklemmen fließenden Strom, und  $I_{cr}$  bezeichnet den über die sekundärseitigen Anschlussklemmen fließenden Strom. Die Spannung an den sekundärseitigen Anschlussklemmen ist mit  $U_{cr}$  bezeichnet.  $U_c$  gibt die an der Hauptinduktivität des Messwandlers anliegende Spannung an, wobei der über die Parallelschaltung aus  $R_H$ ,  $L_{main}$  und Reddy fließende Strom mit  $I_c$  bezeichnet ist, welcher sich gemäß der Figur in einen über den Wirbelstromwiderstand Reddy fließenden Strom  $I_E$  und einen über die Parallelschaltung aus  $R_H$  und  $L_{main}$  fließenden Strom  $I_L$  aufteilt.
- Im Folgenden sind bei der Angabe von Spannungen und Strömen immer die entsprechenden momentanen Werte gemeint, sofern nicht durch den Index „eff“ ausdrücklich auf den Effektivwert verwiesen wird.
- Es ist bekannt, dass der so genannte verkettete Fluss  $\psi$  von der Spannungszeitfläche, das heißt dem Spannungsintegral über die Zeit, an den sekundärseitigen Anschlussklemmen des Messwandlers abhängt. Demzufolge gilt mit  $\psi_0$  als Konstante:
- (1) 
$$\psi(t) = \int_0^t [U_{cr}(t) - R_{cr} \cdot I_{cr}(t)] dt + \psi_0$$

Wird für den Test des Messwandlers lediglich ein Prüfsignal mit relativ niedriger Frequenz verwendet, entstehen je nach Wandlertyp mehr oder weniger große Messfehler durch das bei

der niedrigen Prüffrequenz abweichende Verhalten des Magnet- oder Eisenkerns des Messwandlers. Demzufolge ist ohne Berücksichtigung des frequenzabhängigen Verhaltens des Eisenkerns bei einem Test des Messwandlers mit niedriger Prüffrequenz nur  
5 ein sehr ungenaues Verhalten bei der Nennfrequenz des Messwandlers vorherzusagen. Um genaue Messergebnisse zu erhalten, wird daher ein Simulationsmodell des zu testenden Messwandlers definiert, welches es erlaubt, das frequenzabhängige Verhalten des Messwandlers mit Hilfe von wenigen Parametern zu beschreiben.  
10 Dieses Simulationsmodell wird so einfach wie möglich gehalten, damit einerseits keine aufwändigen Messungen für die Bestimmung dieser Parameter nötig sind und andererseits die anschließenden Berechnungen für einen Rückschluss des Verhaltens des Messwandlers bei einem Betrieb mit der Nennfrequenz  
15 wenig Zeit benötigen.

Für den Test des Messwandlers spielen der Widerstand  $R_p$  der Primärwicklung und die primäre Streuinduktivität  $L_p$  keine Rolle und müssen daher auch nicht gemessen werden. Die sekundäre  
20 Streuinduktivität  $L_s$  kann lediglich relativ aufwändig bestimmt werden. Da sie jedoch im Allgemeinen für das abschließende Messergebnis lediglich eine untergeordnete Rolle spielt, wird sie nachfolgend ebenfalls vernachlässigt.

25 Das in der einzigen Figur dargestellte Ersatzschaltbild eines Messwandlers entspricht weitgehend einem konventionellen Ersatzschaltbild. Wie jedoch bereits zuvor erwähnt worden ist, wird im Gegensatz zu dem konventionellen Ersatzschaltbild die Hauptinduktivität  $L_{main}$  nicht einfach als lineare Induktivität  
30 mit Eisenverlustwiderstand, sondern als nichtlineare Induktivität angenommen, welche für periodische Signale mit Hilfe einer (frequenzabhängigen) Hysteresekurve beschrieben wird. Der Eisenkern des Messwandlers wird daher mit Hilfe der nicht-linearen Hauptinduktivität  $L_{main}$ , welche das nicht-lineare  
35 Verhalten des Eisenkerns ohne Hystereseverhalten (das heißt

verlustlos) beschreibt, dem Hystereseverlustwiderstand  $R_H$ , welcher die Hystereseverluste beschreibt und ebenfalls nicht-linear ist, und dem linearen Wirbelstromwiderstand Reddy, welcher die Wirbelstromverluste im Eisenkern berücksichtigt, modelliert. Die nicht-lineare Hauptinduktivität  $L_{main}$  und der Hystereseverlustwiderstand  $R_H$  werden zusammen mit Hilfe einer frequenzunabhängigen Hysteresekurve beschrieben. Diese Hysteresekurve wird in Bezug auf die Zeit periodisch durchlaufen, wobei jedoch die Form nicht von der Geschwindigkeit des Durchlaufens abhängt und somit auch unabhängig von der zeitlichen Kurvenform der Messgrößen ist. Die Hysteresekurve hängt jedoch von der Aussteuerung des Messwandlers ab und ist je nach Signalamplitude unterschiedlich geformt. Als Parameter diesbezüglich dient der maximale verkettete Fluss  $\psi_{max}$ .

Die Wicklungswiderstände  $R_p$  und  $R_s$  sowie die Streuinduktivitäten  $L_p$  und  $L_s$  werden in dem in der Figur dargestellten Ersatzschaltbild wie bei dem konventionellen oder klassischen Ersatzschaltbild eines Transformators beschrieben.

Neben dem Ersatzschaltbild des zu testenden Messwandlers ist in der Figur auch ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Testgeräts 1, welches insbesondere in Form eines tragbaren Testgeräts ausgestaltet ist, dargestellt.

Das Testgerät 1 umfasst als wesentliche Komponenten eine steuerbare Signalquelle 2, eine Steuereinheit 3 mit einer Messeinrichtung 4 und einer Auswertungs- und Steuereinrichtung 5, einen Speicher 6 zum Speichern von Messergebnissen und eine Schnittstelle 7 zur vorzugsweise bidirektionalen Kommunikation mit einem externen Gerät, beispielsweise einem externen Computer, um von diesem externen Gerät Steuersignale zur automatischen Steuerung des von dem Testgerät 1 durchgeführten Testablaufs zu empfangen oder Test- oder Messergebnisse an dieses externe Gerät zu übertragen. Die Steuereinheit 3, welche auch

die Funktion einer Datenverarbeitungseinheit wahrnimmt, kann in Form eines Controllers und/oder Computers und/oder digitalen Signalprozessors ausgestaltet sein. Die Steuereinheit 3 erzeugt abhängig von einem vorgegebenen Testablauf über die 5 Steuer- und Auswertungseinrichtung 5 Steuersignale für die steuerbare Signalquelle 2, um ein Prüfsignal vorgegebener Frequenz und/oder Spannung an die sekundärseitigen Anschlussklemmen S1, S2 des zu testenden Messwandlers anzulegen. Des Weiteren weist das Testgerät mehrere Messeingänge auf, von denen in 10 der Figur lediglich ein Messeingang beispielhaft dargestellt ist, um über die sekundärseitigen Anschlussklemmen S1, S2 des Messwandlers abgegriffene Messsignale der Messeinrichtung 4 der Steuereinheit 3 zuzuführen, um somit verschiedene frequenz- und vorzugsweise auch spannungsabhängige Parameter des 15 zu testenden Messwandlers zu bestimmen, welche anschließend von der Steuer- und Auswertungseinrichtung 5 ausgewertet werden, um daraus das bereits erwähnte Simulationsmodell abzuleiten, welches der Steuer- und Auswertungseinrichtung Rück- schlüsse auf das tatsächliche Verhalten des zu testenden Mess- 20 wandlers bei beliebigen Frequenzen und Lasten Zb, insbesondere auch bei der eigentlich vorgesehenen Nenn- oder Betriebsfrequenz des Messwandlers, ermöglicht. Die von der Messeinrich- tung 4 erfassten Messergebnisse und/oder das von der Steuer- und Auswertungseinrichtung 5 daraus abgeleitete Simulationsmo- 25 dell können in dem Speicher 6 für einen späteren Zugriff zwis- chengespeichert werden. Auf diese Weise können die Mess- und Testergebnisse auch in Form eines Testberichts archiviert und protokolliert und über eine (in der Zeichnung nicht darge- stellt) Ausgabeeinheit, beispielsweise einen Bildschirm oder 30 einen Drucker, ausgegeben werden. Die Steuereinheit 3 (bzw. die darin enthaltene Steuer- und Auswertungseinrichtung 5) steuert den von dem Testgerät 1 durchgeföhrten Test- oder Prüfablauf des Messwandlers vollautomatisch, das heißt über die steuerbare Signalquelle 2 werden zum Messen der unter- 35 schiedlichen Parameter des Messwandlers, welche die Grundlage

für das Simulationsmodell bilden, automatisch verschiedene Prüfsignale sekundärseitig an den zu testenden Messwandler angelegt, ohne dass ein zwischenzeitlicher Eingriff einer Bedienperson erforderlich wäre. Der Testablauf kann dabei in Übereinstimmung mit einem gespeicherten Programmcode (Software) erfolgen. Ebenso ist auch denkbar, dass – wie bereits zuvor erwähnt worden ist – die Steuerung des Testablaufs über die Schnittstelle 7 mit Hilfe eines externen Geräts erfolgt. Bei der steuerbaren Signalquelle 2 handelt es sich vorzugsweise um eine auf einen vorgegebenen Wert geregelte Signalquelle, welche somit von Netzschwankungen unabhängig ist.

Einer der Parameter des Messwandlers, welche von der Messeinrichtung 4 des Testgeräts 1 zur nachfolgenden Ermittlung des Simulationsmodells des Messwandlers erfasst werden, ist der Widerstand  $R_{ct}$  der Sekundärwicklung des Messwandlers. Zu diesem Zweck wird die steuerbare Signalquelle 2 derart angesteuert, dass von ihr ein Gleichstrom an die sekundärseitigen Anschlussklemmen S1, S2 angelegt wird. Die Messeinrichtung 4 kann daraufhin den Widerstand  $R_{ct}$  des Messwandlers durch Erfassen des Stroms und der Spannung an den sekundärseitigen Anschlussklemmen messen. Der Widerstand  $R_{ct}$  der Sekundärwicklung bei einem Betrieb des Messwandlers mit der Nennfrequenz unterscheidet sich aufgrund des Skin-Effekts und des Proximity-Effekts (Stromverdrängung) prinzipiell von dem gemessenen Widerstandswert, welcher sich bei sekundärseitigem Betrieb des Messwandlers mit Gleichstrom bzw. Gleichspannung einstellt. Diese Unterschiede sind jedoch im Allgemeinen so gering, dass diese Effekte vernachlässigt werden können.

30

Da für den Test des Messwandlers die Modellierung des Eisenkerns des Messwandlers von besonderer Bedeutung ist, ist diesbezüglich auf eine möglichst exakte Modellierung zu achten. Das Verhalten des Eisenkerns des Messwandlers kann mit Hilfe der Hysteresekurve beschrieben werden, welche das Verhalten

zwischen der magnetischen Anregung  $H$  und der magnetischen Flussdichte  $B$  angibt, wenn der Eisenkern mit einem periodischen Signal angeregt wird. Dabei zeigt sich, dass die Form der Hysteresekurve von der Frequenz der periodischen Anregung 5 abhängt. Der Grund hierfür sind vor allem die Wirbelströme im Eisenkern. Aufgrund der sich ändernden magnetischen Flussdichte entstehen im Eisenkern elektrische Wirbelfelder (Induktionsgesetz), welche aufgrund der Leitfähigkeit des Eisens Wirbelströme erzeugen. Die von der Sekundärwicklung des Messwandlers 10 hervorgerufene Wirkung ist gleichwertig zu einer zusätzlichen Wicklung auf dem Eisenkern, welche mit einem Widerstand belastet wird. Somit können – wie auch in der Figur angedeutet ist – die Wirbelstromverluste mit einem linearen Widerstand Reddy modelliert werden. Für die Bestimmung dieses Widerstands 15 Reddy sind zunächst die Hystereseverluste und die Wirbelstromverluste zu trennen.

Im Eisenkern können nur die gesamten Verluste gemessen werden. Hierzu wird die Signalquelle 2 derart angesteuert, dass an die 20 Sekundärwicklung des Messwandlers eine periodische Spannung angelegt und die von dem Messwandler aufgenommene Leistung ermittelt wird, wenn die Primärseite des Messwandlers offen betrieben wird. Ein Teil der von dem Messwandler aufgenommenen Leistung geht in der Sekundärwicklung des Messwandlers verloren, die restliche Leistung im Eisenkern. Das für diese Messung von der Signalquelle 2 erzeugte Prüfsignal kann insbesondere ein nicht-sinusförmiges Prüfsignal, beispielsweise ein Rechteck-Signal, sein, so dass die Signalquelle 2 beispielsweise auch auf besonders billige Art und Weise als wechselweise 25 gepolte Spannungsquelle ausgestaltet sein kann.

Die Aufteilung in Hystereseverluste und Wirbelstromverluste erfolgt aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens im Bezug auf die Anregungsfrequenz, wobei eine gleiche maximale Flussdichte 30 vorausgesetzt wird.

Die Hystereseverluste steigen proportional zur Frequenz an, während die Wirbelstromverluste quadratisch mit der Frequenz ansteigen. Die Gesamtverlustleistung  $P_T$ , die Hystereseverlustleistung  $P_H$  und die Wirbelstrom-Verlustleistung („Eddy Losses“) lassen sich somit in Abhängigkeit von der Frequenz wie folgt beschreiben:

$$(2) \quad P_T(f) = P_H + P_E$$

$$10 \quad P_H(f) = \alpha \cdot f$$

$$P_E(f) = \beta \cdot f^2$$

Mit zwei Messungen bei verschiedenen Anregungsfrequenzen kann eine Trennung der Hystereseverluste und der Wirbelstromverluste erreicht werden. Da zwei Messungen mit unterschiedlicher Frequenz bei einer identischen maximalen Flussdichte durchgeführt werden, können die bei den beiden Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  gemessenen Eisenverluste  $P_1$  und  $P_2$  in Abhängigkeit von den Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$  wie folgt berechnet werden:

20

$$(3) \quad P_1 = \alpha \cdot f_1 + \beta \cdot f_1^2$$

$$P_2 = \alpha \cdot f_2 + \beta \cdot f_2^2$$

Die Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$  lassen sich somit folgendermaßen bestimmen:

$$(4) \quad \alpha = \frac{P_1 \cdot f_2^2 - P_2 \cdot f_1^2}{f_1 \cdot f_2 \cdot (f_2 - f_1)}$$

$$\beta = \frac{P_2 \cdot f_1 - P_1 \cdot f_2}{f_1 \cdot f_2 \cdot (f_2 - f_1)}$$

30 Der Wirbelstromwiderstand Reddy kann dann in Abhängigkeit von den Anregungsfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$ , dem nunmehr bekannten Faktor

$\beta$  und den Effektivwerten  $U_{C_{eff1}}$   $U_{C_{eff2}}$  der Spannung  $U_C$  bei den beiden Messungen mit den Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  folgendermaßen berechnet werden:

5 (5) Reddy =  $\frac{U_{C_{eff1}}^2}{\beta \cdot f_1^2} = \frac{U_{C_{eff2}}^2}{\beta \cdot f_2^2}$

Unter der Annahme des gleichen maximalen Flusses im Eisenkern nehmen die Wirbelstromverluste zunächst mit  $f^2$  zu, bei höheren Frequenzen jedoch nur noch mit  $f^{1,5}$ . Der Übergang von der ersten Gesetzmäßigkeit zu der zweiten Gesetzmäßigkeit hängt von der Leitfähigkeit des Materials, der magnetischen Permeabilität und der Blechstärke (Dicke) der Eisenbleche des Messwandlers ab. Die Blechstärke des Eisenkerns ist immer so dimensioniert, dass nur eine geringe Flussverdrängung bei der Nennfrequenz des Messwandlers auftritt, um die Verluste klein zu halten. Somit ist die Grenze zwischen den beiden Gesetzmäßigkeiten bei einer Frequenz, welche deutlich über der Nennfrequenz des Messwandlers liegt. Bei den hier durchgeföhrten Messungen kann daher mit guter Genauigkeit von einer quadratischen Abhängigkeit der Wirbelstromverluste von der Frequenz ausgegangen werden.

Als weiterer Parameter des zu testenden Messwandlers wird die Hysteresekurve des Messwandlers gemessen. Mit der Hysteresekurve werden die Hystereseverluste  $R_H$  und die Hauptinduktivität  $L_{main}$  des Messwandlers modelliert.

Für die Messung der Hysteresekurve wird die Signalquelle 2 von der Steuereinheit 3 bzw. der darin enthaltenen Steuer- und Auswertungseinrichtung 5 derart angesteuert, dass ein periodisches, gegebenenfalls wiederum nicht-sinusförmiges Prüfsignal an die sekundärseitigen Anschlussklemmen S1, S2 des Messwandlers angelegt wird. Die Messeinrichtung 4 misst die daraufhin an den sekundärseitigen Anschlussklemmen auftretenden Strom-

und Spannungswerte, sodass die Steuer- und Auswertungseinrichtung 5 aus den von der Messeinrichtung 4 gemessenen Strom- und Spannungswerten sowie dem vorher ermittelten Wirbelstromwiderstand auf den Spannungs- und Stromverlauf, das heißt auf die 5 Größen  $U_c$  und  $I_L$ , an der Hauptinduktivität des Messwandlers schließen kann. Das von der Signalquelle 2 erzeugte Prüfsignal besitzt vorzugsweise eine Frequenz, welche unterschiedlich von der Nennfrequenz des Messwandlers, insbesondere deutlich geringer ist.

10

Bei Vernachlässigung der Streuinduktivität des Messwandlers kann die Spannung  $U_c$  und der Strom  $I_L$  an der Hauptinduktivität aus den von der Messeinrichtung 4 gemessenen Strom- und Spannungswerten  $U_{ct}$  und  $I_{ct}$  an den sekundärseitigen Anschlussklemmen 15 des Messwandlers sowie dem zuvor ermittelten Wirbelstromwiderstand Reddy folgendermaßen ermittelt werden:

$$(6) \quad U_c = U_{ct} - R_{ct} \cdot I_{ct}$$

$$I_L = I_{ct} - \frac{U_c}{\text{Reddy}}$$

20

Aus dem zeitabhängigen Spannungsverlauf  $U_c(t)$  kann der verkettete Fluss  $\psi(t)$  in Übereinstimmung mit der obigen Formel (1) berechnet werden. Die Konstante  $\psi_0$  wird so bestimmt, dass der Mittelwert des verketteten Flusses 0 ist, so dass eine Offset- 25 Korrektur gegeben ist.

Der Zusammenhang zwischen dem Strom  $I_L(t)$  und dem verketteten Fluss  $\psi(t)$  wird als Hysteresekurve bezeichnet und ist eine Parameterdarstellung zwischen dem Strom  $I_L(t)$ , welcher proportional zur magnetischen Anregung  $H$  ist, und dem verketteten Fluss  $\psi(t)$ , welcher proportional zur magnetischen Flussdichte  $B$  ist, wobei die Zeit  $t$  der Parameter dieser Funktionsdarstellung ist. Da die Wirbelstromverluste bereits beim Strom  $I_L(t)$  be-

rücksichtigt worden sind, ist diese Hysteresekurve weitgehend unabhängig von der Frequenz.

Die auf diese Weise gewonnene Parameterdarstellung kann in einer zeitunabhängigen Parameterdarstellung umgeformt werden, wenn ein zeitunabhängiger Parameter  $p$  eingeführt wird:

(7)  $\psi_H(p) = \psi(t)$

$I_H(p) = I_L(t)$

10  $p = \frac{t}{T}$

Dabei bezeichnet  $T$  die Periodendauer bei der Messung der Hysteresekurve, während  $\psi_H$  den von dem zeitunabhängigen Parameter  $p$ , welcher im Intervall  $[0,1]$  liegt, abhängigen magnetischen Fluss und  $I_H$  den von dem zeitunabhängigen Parameter  $p$  abhängigen Strom über die Hauptinduktivität des Messwandlers bezeichnet.

Mit Hilfe der obigen Parameterdarstellung kann das Verhalten des Eisenkerns für einen bestimmten maximalen verketteten Fluss  $\psi_{\max}$  bestimmt werden, wobei das Verhalten unabhängig vom zeitlichen Verlauf des Prüfsignals ist. Es wird lediglich vorausgesetzt, dass der Eisenkern mit Hilfe des Prüfsignals periodisch angeregt und derselbe maximale verkettete Fluss  $\psi_{\max}$  erreicht wird.

Soll das Verhalten des Messwandlers bei verschiedenen Aussteuerungen ermittelt werden, so ist für jede Aussteuerung jeweils eine eigene Hysteresekurve zu ermitteln, und genau für diese Aussteuerung gilt dann das ermittelte mathematische Simulationsmodell. Somit wird im Prinzip für eine vollständig Beschreibung des Messwandlers eine Schar von Hysteresekurven be-

nötigt, wobei jede Hysteresekurve mit dem maximalen verketteten Fluss charakterisiert werden kann.

Mit Hilfe der auf zuvor beschriebene Art und Weise von der  
5 Messeinrichtung 4 des Testgeräts 1 gemessenen Messgrößen des  
zu testenden Messwandlers kann ein mathematisches Simulations-  
modell des Messwandlers gebildet werden, dessen Parameter die  
gemessenen Messgrößen sind. Mit Hilfe dieses Simulationsmo-  
dells kann das Verhalten des Messwandlers bei unterschiedli-  
10 cher Belastung und insbesondere bei einer von der Frequenz des  
Prüfsignals abweichenden Betriebsfrequenz und auch bei einem  
Betrieb des Messwandlers mit einer Spannung mit einer anderen  
Kurvenform als das Prüfsignal ermittelt werden.  
  
15 Grundsätzlich ist es möglich, den Verlauf des verketteten  
Flusses im Eisenkern des Messwandlers exakt zu bestimmen, wenn  
eine sinusförmige Spannung an den Klemmen des Messwandlers  
(z.B. mit harmonischer Balance) vorgegeben wird. Der hierzu  
notwendige Rechenaufwand ist jedoch relativ hoch, so dass ein  
20 vereinfachtes Verfahren angestrebt wird, welches nachfolgend  
beschrieben werden soll.

Als Ansatzpunkt für dieses vereinfachte Verfahren dient ein  
sinus- bzw. cosinusförmiger Verlauf des verketteten Flusses  
25 bei der Nennfrequenz  $f_N$  des Messwandlers:

$$(8) \quad \psi(t) = -\psi_{\max} \cdot \cos(2\pi f_N t)$$

Damit erhält man eine induzierte Spannung  $U_c$  in der Sekundär-  
30 wicklung des Messwandlers in Abhängigkeit von der Nennfrequenz  
 $f_N$  und dem maximalen verketteten Fluss  $\psi_{\max}$  wie folgt:

$$(9) \quad U_c = 2\pi f_N \cdot \psi_{\max} \cdot \sin(2\pi f_N t)$$

Somit kann für jeden Zeitpunkt  $t$  der verkettete Fluss  $\psi(t)$  angegeben und anhand der Parameterdarstellung der Hysteresekurve der zeitunabhängige Parameter  $p$  genau für diesen Zeitpunkt  $t$  ermittelt werden, um daraus den Strom  $I_L(t)$  für diesen Zeitpunkt zu bestimmen (vgl. die obigen Formeln (1) und (7)). Der zeitliche Verlauf des Stromes  $I_L(t)$  kann somit genau angegeben werden.

Mit Hilfe der Kirchhoff'schen Regeln kann auf Grundlage der nunmehr bekannten Größen  $I_L$ ,  $U_C$  und Reddy der sekundäre Klemmenstrom  $I_{CT}$  und die sekundäre Klemmenspannung  $U_{CT}$  des Messwandlers wie folgt bestimmt werden:

$$(10) \quad I_{CT} = I_L + \frac{U_C}{\text{Reddy}}$$

$$15 \quad U_{CT} = U_C + I_{CT} \cdot R_{CT}$$

Der zeitliche Verlauf der Klemmenspannung  $U_{CT}(t)$  ist nicht mehr exakt sinusförmig, da der Strom starke Verzerrungen aufweist und am Widerstand  $R_{CT}$  eine dazu proportionale Spannung abfällt. Die Abweichung von der Sinusform ist im Allgemeinen sehr gering, da der Wicklungswiderstand des Messwandlers im Allgemeinen sehr klein ist.

Üblicherweise wird bei der von der Anmelderin als „CT-Excitation Curve“ bezeichneten Art der Testdarstellung der Zusammenhang des Effektivwerts des Stroms  $I_{CT}$  und der Spannung  $U_{CT}$  an der Sekundärseite des Messwandlers bei offener primärer Wicklung dargestellt. Für den Fall, dass die Spannung  $U_{CT}$  keinen sinusförmigen Verlauf aufweist, kann anstelle des Effektivwerts ein korrigierter Gleichrichtwert verwendet werden, wobei als Korrekturfaktor der Sinus-Formfaktor dient:

$$(11) \quad U_{ct} = \frac{\pi}{T\sqrt{8}} \int_0^T |U_{ct}(t)| dt$$

$$I_{ct} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{ct}^2(t) dt}$$

(Darstellung des Stromes als Effektivwert gemäß Norm IEC 60044-1)

$$I'_{ct} = \max |I_{ct}(t)|$$

(Darstellung des Stromes als Spitzenwert gemäß Norm IEC 60044-6)

5

10  $U_{ct}'$  bzw.  $I_{ct}'$  bezeichnen den jeweils korrigierten Wert der sekundärseitigen Klemmenspannung bzw. des sekundärseitigen Klemmenstroms. Durch die zuvor beschriebene Maßnahme kann im wesentlichen unabhängig von der Kurvenform derselbe maximale Fluss erreicht werden.

15 Damit kann jeweils ein Punkt dieser Anregungskurve („CT-Excitation Curve“, CT = „Current Transformer“) aus jeweils einer Hysteresekurve erhalten werden. Für die gesamte Anregungskurve ist eine entsprechend große Anzahl von Hysteresekurven zu ermitteln.

20 Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass die oben angeführten Berechnungsmethoden lediglich beispielhaft zu verstehen sind, wobei insbesondere auch eine Verfeinerung dieser Berechnungsmethoden möglich ist.



Patentansprüche

- 5 1. Verfahren zum Testen eines Transformators,  
wobei zum Testen des Transformators an den Transformator ein  
Prüfsignal mit einer bestimmten Frequenz angelegt wird,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass mit dem Prüfsignal mehrere Parameter des Transformators  
10 gemessen werden,  
dass aus den mit dem Prüfsignal gemessenen Parametern ein Si-  
mulationsmodell, welches das Verhalten des Transformators bei  
unterschiedlichen Frequenzen simuliert, abgeleitet wird, und  
dass mit Hilfe des Simulationsmodells das Verhalten des Trans-  
15 formators bei Betrieb mit einer von der Frequenz des Prüfsig-  
nals abweichenden Frequenz ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,  
dadurch gekennzeichnet,  
20 dass die Frequenz des Prüfsignals kleiner als die Nennfrequenz  
des Transformators ist, und  
dass mit Hilfe des Simulationsmodells das Verhalten des Trans-  
formators bei Betrieb mit der Nennfrequenz ermittelt wird.
- 25 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Prüfsignal an sekundärseitige Anschlüsse (S1, S2) des  
Transformators angelegt wird, und  
dass die Parameter des Transformators an den sekundärseitigen  
30 Anschlüssen (S1, S2) des Transformators gemessen werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Prüfsignal mit einer Spannung an den Transformator  
35 angelegt wird, welche kleiner als die bei einem Betrieb des

Transformators mit der Nennfrequenz zur Messung des Kniepunkts erforderliche Spannung ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
5 dadurch gekennzeichnet,  
dass mit dem Prüfsignal mehrere frequenz- und/oder spannungs-  
abhängige Parameter des Transformators gemessen werden, um  
daraus das Simulationsmodell abzuleiten.
- 10 6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass als einer der Parameter der Widerstand ( $R_{ct}$ ) der Sekundär-  
wicklung des Transformators gemessen wird, wobei hierzu als  
15 Prüfsignal ein Gleichstromsignal an sekundärseitige Anschlüsse  
(S1, S2) des Transformators angelegt und die an den sekundär-  
seitigen Anschlüssen (S1, S2) des Transformators auftretende  
Spannung ( $U_{ct}$ ) und der über die sekundärseitigen Anschlüsse  
(S1, S2) des Transformators fließende Strom ( $I_{ct}$ ) gemessen wer-  
den, um daraus den Widerstand ( $R_{ct}$ ) der Sekundärwicklung abzu-  
20 leiten.
- 25 7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass als einer der frequenzabhängigen Parameter des Transfor-  
mators der Wirbelstromwiderstand (Reddy) des Transformators  
gemessen wird, wobei hierzu mehrere Messungen durch Anlegen  
eines periodischen Prüfsignals mit jeweils unterschiedlicher  
Frequenz an sekundärseitige Anschlüsse (S1, S2) des Transfor-  
mators durchgeführt werden, und wobei die bei den einzelnen  
30 Messungen von dem Transformator sekundärseitig aufgenommene  
Leistung ermittelt wird, um daraus den Wirbelstromwiderstand  
(Reddy) abzuleiten.
- 35 8. Verfahren nach Anspruch 7,  
dadurch gekennzeichnet,

dass zur Messung des Wirbelstromwiderstands (Reddy) des Trans-  
formators zwei Messungen bei zwei verschiedenen Frequenzen  $f_1$   
und  $f_2$  durchgeführt und die bei den beiden Messungen von dem  
Transformator aufgenommene Leistung  $P_1$  und  $P_2$  gemessen wird,  
5 wobei gilt:

$$P_1 = \alpha \cdot f_1 + \beta \cdot f_1^2$$

$$P_2 = \alpha \cdot f_2 + \beta \cdot f_2^2,$$

wobei die Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$  in Abhängigkeit von den Frequenzen  
 $f_1$  und  $f_2$  sowie den Leistungen  $P_1$  und  $P_2$  wie folgt bestimmt wer-  
10 den:

$$\alpha = \frac{P_1 \cdot f_2^2 - P_2 \cdot f_1^2}{f_1 \cdot f_2 \cdot (f_2 - f_1)}$$

$$\beta = \frac{P_2 \cdot f_1 - P_1 \cdot f_2}{f_1 \cdot f_2 \cdot (f_2 - f_1)},$$

um daraus den Wirbelstromwiderstand (Reddy) abzuleiten.

15 9. Verfahren nach Anspruch 8,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der Wirbelstromwiderstand Reddy über folgende Beziehung  
bestimmt wird:

$$\text{Reddy} = \frac{U_{C_{eff1}}^2}{\beta \cdot f_1^2} = \frac{U_{C_{eff2}}^2}{\beta \cdot f_2^2},$$

20 wobei  $U_{C_{eff1}}$  den Effektivwert der Spannung an der Hauptinduktivi-  
tät des Transformators bei der Messung mit der Frequenz  $f_1$   
und  $U_{C_{eff2}}$  den Effektivwert der Spannung an der Hauptinduktivi-  
tät des Transformators bei der Messung mit der Frequenz  $f_2$  be-  
zeichnet.

25 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass als einer der Parameter des Transformators die Hysterese-  
kurve des Transformators gemessen wird, wobei hierzu als Prüf-  
30 signal ein periodisches Signal an sekundärseitige Anschlüsse  
(S1, S2) des Transformators angelegt wird und die sich darauf-

hin an den sekundärseitigen Anschlüssen (S1, S2) einstellenden Strom- und Spannungswerte gemessen werden, um daraus sowie in Abhängigkeit von dem Wirbelstromwiderstand (Reddy) des Transformators den Spannungs- und Stromverlauf ( $U_c$ ,  $I_L$ ) an der 5 Hauptinduktivität des Transformators zur Ermittlung der Hysteresekurve abzuleiten.

11. Verfahren nach Anspruch 10,  
dadurch gekennzeichnet,  
10 dass die Spannung  $U_c$  und der Strom  $I_L$  an der Hauptinduktivität des Transformators aus der an den sekundärseitigen Anschlüssen (S1, S2) des Transformators gemessenen Spannung  $U_{ct}$ , dem an den sekundärseitigen Anschlüssen (S1, S2) gemessenen Strom  $I_{ct}$ , dem Widerstand  $R_{ct}$  der Sekundärwicklung des Transformators und dem 15 Wirbelstromwiderstand Reddy wie folgt abgeleitet werden:

$$U_c = U_{ct} - R_{ct} \cdot I_{ct}$$

$$I_L = I_{ct} - \frac{U_c}{\text{Reddy}} .$$

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
20 dadurch gekennzeichnet,  
dass mit Hilfe des Simulationsmodells das Verhalten des Transformators bei Betrieb mit einer von der Frequenz des Prüfsignals abweichenden Frequenz und einer beliebigen sekundärseitigen Last (Zb) ermittelt wird.  
25

13. Verfahren nach Anspruch 12,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass als Parameter des Transformators der Widerstand  $R_{ct}$  der Sekundärwicklung des Transformators, der Wirbelstromwiderstand 30 Reddy des Transformators und die Hysteresekurve, welche den Verlauf der Spannung  $U_c$  und des Stroms  $I_L$  an der Hauptinduktivität des Transformators angibt, gemessen werden,  
dass der zeitliche Verlauf des verketteten Flusses des Transformators in Abhängigkeit von der Frequenz bestimmt wird, um

davon abhängig die Spannung  $U_c$  an der Hauptinduktivität des Transformators abzuleiten und in Abhängigkeit davon den entsprechenden Strom  $I_L$  an der Hauptinduktivität des Transformators über die gemessene Hysteresekurve zu bestimmen, und

- 5 dass der über sekundärseitige Anschlüsse (S1, S2) des Transformators fließende Strom  $I_{CT}$  und die an den sekundärseitigen Anschlüssen (S1, S2) auftretende Spannung  $U_{CT}$  für die vorgegebene Frequenz anschließend wie folgt bestimmt werden:

$$I_{CT} = I_L + \frac{U_c}{R_{Eddy}}$$

10  $U_{CT} = U_c + I_{CT} \cdot R_{CT}$ .

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,  
dass als Prüfsignal ein nicht-sinusförmiges Prüfsignal verwendet wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass als Prüfsignal ein Rechtecksignal verwendet wird.

- 20 16. Testvorrichtung zum Testen eines Transformators,  
mit einer Prüfsignalquelle (2) zum Anlegen eines Prüfsignals an den Transformator,  
mit einer Messeinrichtung (4) zum Messen mehrerer Parameter  
25 des Transformators bei an dem Transformator angelegtem Prüfsignal, und  
mit einer Auswertungseinrichtung (5) zum Auswerten der mit dem Prüfsignal gemessenen Parameter und zum Ableiten eines Simulationsmodells daraus, welches das Verhalten des Transformators bei unterschiedlichen Frequenzen simuliert, um mit Hilfe des Simulationsmodells das Verhalten des Transformators bei Betrieb mit einer von der Frequenz des Prüfsignals abweichenden Frequenz zu ermitteln.

17. Testvorrichtung nach Anspruch 16,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Messeinrichtung (4) und die Auswertungseinrichtung  
(5) in einer Steuereinheit (3), welche in Form eines Control-  
lers und/oder Computers und/oder digitalen Signalprozessors  
ausgestaltet ist, integriert sind.
18. Testvorrichtung nach Anspruch 16 oder 17,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Testvorrichtung mindestens einen mit sekundärseitigen  
Anschlüssen (S1, S2) des Transformators zu verbindenden Prüf-  
signalaustritt zum Anlegen des Prüfsignals an die sekundärsei-  
tigen Anschlüsse (S1, S2) aufweist, und  
dass die Testvorrichtung mehrere mit den sekundärseitigen An-  
schlüssen (S1, S2) zu verbindende Messeingänge zum Messen der  
Parameter des Transformators aufweist.
19. Testvorrichtung nach einem der Ansprüche 16-18,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Testvorrichtung in ein tragbares Gerät integriert  
ist.
20. Testvorrichtung nach einem der Ansprüche 16-19,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Testvorrichtung Speichermittel (6) zum Speichern der  
gemessenen Parameter des Transformators und/oder des Simulati-  
onsmodells des Transformators und/oder von Informationen, wel-  
che das Verhalten des Transformators bei dem Betrieb mit der  
von der Frequenz des Prüfsignals abweichenden Frequenz be-  
schreiben, aufweist.
21. Testvorrichtung nach einem der Ansprüche 16-20,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Testvorrichtung eine Schnittstelle (7) zur Übertra-  
gung der gemessenen Parameter des Transformators und/oder des

Simulationsmodells des Transformators und/oder von Informationen, welche das Verhalten des Transformators bei dem Betrieb mit der von der Frequenz des Prüfsignals abweichenden Frequenz beschreiben, an ein externes Gerät und/oder zum Empfang externer Steuersignale zur automatischen Steuerung des von der Testvorrichtung realisierten Testablaufs aufweist.

- 5 22. Testvorrichtung nach einem der Ansprüche 16-21,  
dadurch gekennzeichnet,
- 10 dass die Testvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach  
einem der Ansprüche 1-15 ausgestaltet ist.



Zusammenfassung

Um mit möglichst geringem Aufwand und insbesondere mit einer Prüfsignalquelle mit geringer Ausgangsleistung einen Transformator, insbesondere einen Messwandler, testen zu können, wird vorgeschlagen, an den zu testenden Transformator ein Prüfsignal anzulegen, dessen Frequenz kleiner als die Nennfrequenz des Transformators ist. Mit Hilfe des Prüfsignals werden mehrere frequenzabhängige Parameter, insbesondere der Wirbelstromwiderstand (Reddy) und die Hysteresekurve ( $U_c$ ,  $I_L$ ) des Transformators, gemessen, um daraus ein Simulationsmodell abzuleiten, welches das Verhalten des Transformators bei unterschiedlichen Frequenzen simuliert. Mit Hilfe dieses Simulationsmodells kann schließlich auf das Verhalten des Transformators, das heißt auf die sekundärseitige Klemmenspannung ( $U_{ct}$ ) und den sekundärseitigen Klemmenstrom ( $I_{ct}$ ), bei Betrieb mit einer von der Frequenz des Prüfsignals abweichenden Frequenz, insbesondere bei Betrieb mit der Nennfrequenz des Transformators, geschlossen werden.





